中国生态农业学报 2016年11月 第24卷 第11期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2016, 24(11): 1491−1499

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160347

河北低平原区春玉米一熟替代麦玉两熟制的水生态与粮食安全分析*

闫 鹏[1] 陈源泉[1] 张学鹏[1] 陶志强[2] 杨肖蕾[1] 隋 鹏[1**]

(1. 中国农业大学农学院 北京 100193; 2. 中国农业科学院作物科学研究所 北京 100081)

摘 要 本研究针对河北低平原区水资源日益短缺的现状, 于2011—2014年在河北省吴桥县开展田间试验, 以小麦–玉米两熟制(WS)为对照, 设置零灌溉春玉米一熟制(SMRF)和适水条件下春玉米一熟制(SMSW)2种种植模式, 共3个处理, 研究该区改传统高耗水的小麦–玉米两熟制为春玉米一熟制的可行性。结果表明: 周年耗水量SMSW、SMRF较WS分别降低48.4%和54.2%; 冬小麦耗水主要来自灌溉水和土壤储水, 试验年间降雨仅能满足冬小麦耗水总量的32.9%, 春玉米生育期内耗水主要来自降雨, 试验年间SMSW和SMRF生育期内有效降雨总量分别满足春玉米耗水总量的91.9%和94.9%。SMSW和SMRF周年产量平均较WS分别降低24.4%和45.8%。SMSW和SMRF水分利用效率较WS平均分别高24.8%和0.3%。SMSW和SMRF的经济效益较WS平均分别减少5.2%和36.8%。经济水分利用效率SMSW和SMRF较WS平均分别高56.7%和17.5%。当下WS较SMSW仍具有一定的产量和效益优势, 但WS对地下水灌溉依赖严重; 而SMSW的水分利用效率和经济水分利用效率显著高于WS, 未来随着春玉米高产技术体系的成熟, 春玉米产量的进一步提高, 在我国粮食总产、库存、进口"三增"的"新常态"下, 该区改小麦玉米两熟为春玉米一熟具有兼顾水生态和粮食安全的可行性。

关键词 河北低平原 小麦–玉米两熟制 春玉米一熟制 耗水量 产量 水分利用效率 经济效益

中图分类号: S-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)11-1491-09

Security of water-ecology and food under replacement of winter wheat-summer maize rotation with spring maize mono-cropping in Hebei Lowland Plains*

YAN Peng[1], CHEN Yuanquan[1], ZHANG Xuepeng[1], TAO Zhiqiang[2], YANG Xiaolei[1], SUI Peng[1**]

(1. College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. Institute of Crop Science of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract Hebei Lowland Plains, one of the main grain producing areas in China, has an acute water shortage. To ensure sustainable development in the plains, strategies are needed to manage the water shortage and obtain high crop yield in the region. In terms of water-saving and high-yield farming systems for the region, spring maize mono-cropping has shown to be a promising alternative to the traditional winter wheat-summer maize double-cropping system. A comprehensive comparison between the effects of the winter wheat-summer maize rotation and the spring maize mono-cropping on water ecological security and food security in the study area under different yield levels has not yet been tested. Thus, field experiments were conducted at Wuqiao Experiment Station of China Agricultural University in the Hebei Lowland Plains in 2011–2014 to determine the feasibility of replacing traditional high irrigation costs of the winter wheat-summer maize double-cropping

* 河北省科技计划项目(14227006D)和中央高校基本科研业务费专项基金项目(2015NX007)资助
** 通讯作者: 隋鹏, 主要从事区域节水型农作制研究。E-mail: suipeng@cau.edu.cn
闫鹏, 主要从事节水高产农作制度研究。E-mail: pengyanhnnd@163.com
收稿日期: 2016-04-13 接受日期: 2016-06-12

* This work was supported by Hebei Province Science and Technology Planning Project (14227006D) and the Chinese Universities Scientific Fund (2015NX007).
** Corresponding author, E-mail: suipeng@cau.edu.cn
Received Apr. 13, 2016; accepted Jun. 12, 2016

rotation system with the spring maize mono-cropping system. The three treatments implemented in the experiment included a winter wheat and summer maize double-cropping rotation (WS), a rain-fed spring maize mono-cropping system (SMRF) and a fully-irrigated spring maize mono-cropping system (SMSW) — in which treatment WS was used as the control (CK). Four main factors were evaluated — actual annual evapotranspiration (ET_a), productivity, water use efficiency (WUE), economic benefit and economic water use efficiency (EWUE) — that influenced the performance of the three treatments. Results showed that average annual ET_a was highest under WS, followed by SMSW and SMRF. Average annual ET_a under SMSW and SMRF decreased by 48.4% and 54.2%, respectively, compared with WS. Under WS cropping system, precipitation accounted for only 32.9% of total water consumption by winter wheat during the three-year experimentation period, while irrigation and soil water were the two main water sources of winter wheat. Adversely, precipitation accounted for 91.9% and 94.9% of total water consumption under SMSW and SMRF systems. Average annual productivity under SMSW and SMRF systems decreased respectively by 24.4% and 45.8%, compared with WS rotation system. In addition, economic benefits were highest under WS, although those under SMSW and WS were very close, with SMSW only 5.2% lower than WS on average. SMRF economic benefits were 36.8% lower than that of WS. However, WUE and EWUE under WS were lower than those under SMSW and SMRF. While WUE increased by 24.8% and 0.3%, EWUE increased by 56.7% and 17.5% respectively under SMSW and SMRF compared with those of WS. Although WS had higher annual grain yield and economic benefits, this was driven primarily by the unsustainable use of intensive irrigation. In comparison to WS, food security under SMSW system reached 75.7% with 46.7% groundwater irrigation. With advancements in spring maize production technology, there was the potential to increase the productivity of spring maize. Compared to the double-cropping system, the spring maize mono-cropping system was a water-saving, high-yielding and efficient alternative cropping system. To balance water resources and food security in the Hebei Lowland Plains, China's "new normal" conditions with the "Three Increases" (increases in grain production, storage and import) has shifted the ideal cropping system from the winter wheat-summer maize rotation system to a more sustainable spring maize mono-cropping system.

Keywords Hebei Lowland Plains; Wheat-maize double-cropping system; Spring maize mono-cropping system; Evapotranspiration; Productivity; Water use efficiency; Economic benefits

河北低平原区是我国重要的粮食产区之一，冬小麦(*Triticum aestivum*)–夏玉米(*Zea mays*)一年两熟制是当前该地区的主要种植制度，该地区多年平均降雨量为 500~600 mm，但自然降雨分布不均，农业生产主要依靠抽取地下水灌溉来维持高产。目前，农业灌溉用水占到该地区用水总量的 70%左右，长期抽取地下水灌溉导致该地区地下水位不断下降，该地区已经形成了我国最大的地下水漏斗区，也是我国地下水漏斗"成长"最快的地区。该区深层地下水低于海平面的范围已达 76 732 km^2，占平原区总面积的 55%[1]。因此，在保证国家粮食安全和经济效益不降低的前提下，调整和创新该区域的种植模式，以降低农业灌溉用水，提高水分利用效率和经济效益对该区域的农业可持续发展具有重要意义。作物种植布局与结构调整技术是农业节水技术体系中重要的一环[2]，在严重缺水地区成为重要的研究内容之一[3–6]。随着河北低平原区水资源危机的加剧，加上季节性干旱频发，通过不断优化作物结构、调整种植模式提高水资源的利用效率，增加农民收入等方面备受学者们关注[7–11]。宫飞[12]以北京顺义区作为研究案例，提出区域结构型节水种植制度优化调整策略，认为黑麦(*Secale cereale*)、旱稻(*Oryza sativa*)及黑麦、棉花(*Anemone vitifolia* spp.)这一新的作物组合较常规的种植模式冬小麦–夏玉米一年两熟制具有较好的水分利用效率和经济效益。隋鹏[13]以河北栾城县为例对黄淮海平原节水种植模式进行了生态经济分析和优化配置研究，认为该地区以巨大的水生态代价为支撑的农作模式(冬小麦–夏玉米)是不可持续的，而春玉米一熟种植模式在未来可以作为水资源亏缺地区的节水高效模式。郭步庆等[14]研究认为华北平原冬小麦–夏玉米–春玉米两年 3 熟模式节水效果明显，水分利用效率显著提高，该模式进一步完善后可适当推广。戴明宏等[15]研究表明，华北地区春玉米生产潜力超过 15 000 kg·hm^{-2}，仇焕广等[16]认为未来中国的玉米供需缺口还将进一步扩大。陶志强[17]研究认为春玉米一熟制在该地区节水效果显著，能够节约 150 mm 由地下抽取的灌溉水，但产量只能达到麦玉两熟的 76.7%。虽然前人已经对华北地区春玉米一熟制和冬小麦轮作夏玉米一年两熟做过一定的研究对比，但是从春玉米节水高产和全雨养的角度比较不同种植模式的节水和经济效益研究较少。本研究以传统的冬小麦–夏玉米一年两熟制(以下简称"麦玉两熟")为对照，测定冬小麦、夏玉米和春玉米播前和收获后的土壤含水量和产量，记录

生产过程中的各种投入和收益，系统地比较不同种植模式的生态和经济效益，为该地区作物布局的优化和种植结构的调整提供研究基础和理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2011 年 10 月—2014 年 10 月在河北省吴桥县中国农业大学吴桥实验站(37°41′N, 116°37′E)进行。该区地处海河低平原黑龙港流域中部，属于暖温带季风气候, 1990—2014 年年平均降水量 568 mm, 全年降水的 50%~80%集中在 6—8 月，其中小麦季平均降水为 120 mm 左右，年蒸发量 1 700 mm，日照时数 2 340 h, >10 ℃积温 4 665 ℃。

试验年份 2011 年 10 月—2014 年 10 月逐月累计降水量如图 1，其中 2012 年、2013 年和 2014 年全年累计降雨量分别为 698 mm、611 mm 和 422 mm。根据国内常用的降雨年型划分标准[18]，将 2012—2014 年的试验年份按照年均降雨量的大小划分为 3 种不同的降雨年型，分别为丰水年、平水年和枯水年。不同的降雨年型按照如下标准划分：丰水年，$P_i>P+0.33\sigma$；枯水年，$P_i<P+0.33\sigma$。式中：P_i 为当年降雨量(mm), P 为 1990—2014 年平均降雨量(mm); σ 为 1990—2014 年降雨量的标准差(mm)。结果表明，研究区年均降雨量大于 618 mm 的年份为丰水年，年均降雨量小于 518 mm 的年份为枯水年，年均降雨量介于 518~618 mm 的年份为平水年。因此，在试验期间, 2012 年降雨较为丰富，为丰水年; 2013 年降雨略高于多年平均值，为平水年；2014 年全年降雨量较 1990—2014 年平均降雨量减少了 146 mm，为枯水年。

试验地 0~80 cm 土层为壤土，胶泥层分布在 80~160 cm 左右，160 cm 以下为砂土。试验地 0~40 cm 土层容重平均为 1.6 g·cm^{-3}，田间持水量为 20.6%，永久凋萎系数为 6.9%。

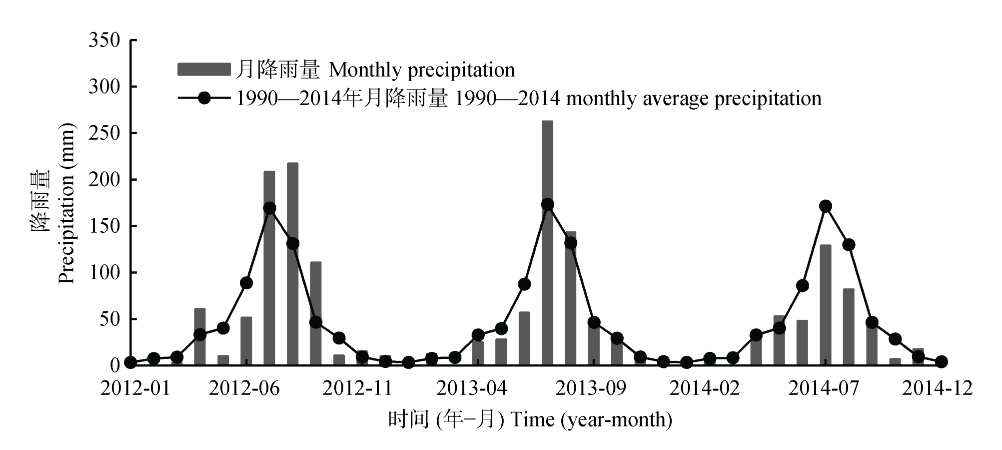


图 1　2011 年 10 月—2014 年 10 月 10 年间吴桥试验站逐月累计降雨量与 1990—2014 年多年逐月累计降雨平均值
Fig. 1　Temporal distribution of monthly accumulative precipitation from October 2011 to October 2014, and the average monthly precipitation from 1990 to 2014 at Wuqiao Station

1.2　试验设计与试验方法

试验设置了麦玉两熟制(WS)、零灌溉春玉米一熟制(SMRF)和适水条件下春玉米一熟制(SMSW) 3 个处理，每个处理设置 3 次重复，小区面积 5 m×16 m=80 m^2。冬小麦(WW)供试品种为‘济麦 22’，夏玉米(SM)品种为‘郑单 958’，春玉米品种为‘金海 5 号’。WS 参考当地传统的生产模式，在一个生产周期定额灌溉 300 mm，分别在小麦的播种前、返青期、扬花期和玉米播种前共灌溉 4 次，每次定额灌溉 75 mm。春玉米适水处理中土壤含水量下限设定为苗期 65% (0~40 cm 土壤含水量占田间持水量的百分比，下同)、拔节期 70%、大喇叭口期 70%、抽穗期 70%[19]，在各生育时期测定土壤含水量，当 0~40 cm 土层含水量低于设定值时，则补充灌溉至田间持水量，并记录灌溉量，最后累加各生育时期的灌溉量即为 SMSW 处理的灌溉总量。试验小区采用漫灌方式进行，每个小区设有独立的水表控制灌溉量。其他田间管理措施见表 1。

1.2.1　试验数据的获取

气象数据：降雨量数据来自于吴桥县气象局，距试验地约 800 m。

灌溉量：麦玉两熟模式按照上述试验设计的灌溉量和灌溉时间实施；春玉米适水模式在各个生育期每间隔 7~10 d 利用德国 TRIME-PICO 便携式土壤水分测量仪测定 0~40 cm 土壤含水量(体积)，并按照公式(1)和公式(2)分别计算单次灌溉定额(mm)和全生育期灌溉量(mm)。

$$灌溉定额(mm)=H\times(\theta_f-\theta_c) \quad (1)$$

表 1 2011—2014 年不同种植模式的田间管理方案

Table 1 Field management plans of different crop patterns from 2011 to 2014

种植模式 Cropping pattern	年份 Year	作物 Crop	播种日(月–日) Sowing date (month-day)	收获日(月–日) Harvest date (month-day)	灌溉量 Irrigation (mm)	施肥量 Fertilizer rate ($kg\cdot hm^{-2}$)		
						氮 N	磷 P_2O_5	钾 K_2O
WS	2012—2014	冬小麦 Winter wheat	10-15	06-10	225	240	180	75
		夏玉米 Summer maize	06-15	10-10	75	180	45	90
SMRF	2012	春玉米 Spring maize	04-18	08-17	0	240	180	150
	2013	春玉米 Spring maize	04-09	08-16	0	240	180	150
	2014	春玉米 Spring maize	05-25	09-30	0	240	180	150
SMSW	2012	春玉米 Spring maize	04-18	08-17	105	240	180	150
	2013	春玉米 Spring maize	04-09	08-16	70	240	180	150
	2014	春玉米 Spring maize	05-25	09-30	140	240	180	150

WS: 小麦–玉米两熟制; SMRF: 零灌溉春玉米一熟制; SMSW: 适水条件下春玉米一熟制。下同。WS: winter wheat-summer maize cropping system; SMRF: one cropping system of rain-fed spring maize; SMSW: one cropping system of full irrigated spring maize. The same below.

式中: H 为土层深度(mm), θ_f 为 0~40 cm 田间持水量(体积含水量), θ_c 为灌溉前 0~40 cm 土壤体积含水量。全生育期灌溉量为每次灌溉定额的总和。

土壤质量水分含量: 采用烘干法测定 0~200 cm 土壤质量含水量, 在每个小区中部选择 1 个代表性的取样点, 每 20 cm 一层测定 1 次, 分别在播种前和收获前后各测定 1 次。

土壤容重: 采用环刀法进行测定, 在每个小区中部选择 1 个代表性的取样点, 每 20 cm 一层测定 1 次, 在播种前和收获前后各测定 1 次。

投入和产出: 在试验进行期间, 记录各项农资投入(如种子、农药、化肥、水电)和人工机械投入费用, 人工费用和机械费用按照当地平均工资水平, 其中女工 35 元$\cdot$人$^{-1}\cdot d^{-1}$(8 h), 男工 40$\cdot$人$^{-1}\cdot d^{-1}$(8 h)。粮食收获以后, 按照 2012—2014 年小麦和玉米价格参考《中国农产品价格调查年鉴》折算当年当季经济产出数据。

产量: 作物成熟后, 在每个小区选取 3 个长势相对均匀的样点, 每个样点取 5 m^2 全部收获, 单独脱粒后晒干计算产量(籽粒的体积含水量 13.5%)。

周年产量: 周年产量为单位土地面积全年收获作物经济产量的总和(籽粒的体积含水量 13.5%)。

1.2.2 土壤水分含量及经济效益计算

0~200 cm 土壤体积含水量:

$$\mathrm{VWC} = \mathrm{MWC} \times \rho_b \times 100\% \tag{2}$$

式中: VWC 为土壤体积含水量, MWC 为土壤质量含水量, ρ_b($g\cdot cm^{-3}$)为土壤容重。

土层储水量:

$$\mathrm{SWC} = \mathrm{VWC} \times H \tag{3}$$

式中: SWC 为土层土壤储水量(mm), H 为土层厚度(mm)。

$$\mathrm{SWC}_i = \sum_1^i \mathrm{VWC}_i \times H_i \tag{4}$$

式中: SWC_i 为 0~200 cm 土壤各土层(20 cm 一层)土壤储水量之和, VWC_i 为第 i 土层的体积含水量($cm^3\cdot cm^{-3}$), H_i 为第 i 层的土壤厚度(mm)。

作物全生育期农田耗水量($\mathrm{ET_a}$)可由农田水量平衡公式计算:

$$\mathrm{ET_a} = R + I - F \pm Q + W_s - W_p \tag{5}$$

式中: $\mathrm{ET_a}$(mm)为作物蒸发蒸腾量, R(mm)为降雨量, I(mm)为灌溉量, F(mm)为地表径流, Q(mm)为上移或下渗量, W_s、W_p(mm)分别为播前和收获后的土壤储水量。试验所在地地下水埋深为 9 m 左右, 未见地表径流的发生, 所以 F 可忽略不计, 将耗水量公式简化为公式:

$$\mathrm{ET_a} = R + I - Q + W_s - W_p \tag{6}$$

灌溉或降雨下渗量利用入渗补给系数法计算, 根据 Sun 等[20]提供的入渗补给经验公式计算(9), 计算各作物生长季渗漏量:

$$Q = a(R + I) \tag{7}$$

式中: R(mm)为降雨量; I(mm)为灌溉量; α 是渗漏回补系数, 在本文中, 当连续 5 d 的降雨总量≤90 mm 时, α 取值 0.1, 连续 5 d 的累计降雨量大于 90 mm 且小于 250 mm 时, α 取值 0.15, 连续 5 d 的累计降雨量≥250 mm 时, α 取值 0.2。

水分利用效率:

$$\mathrm{WUE} = Y / \mathrm{ET_a} \tag{8}$$

经济水分利用效率:

$$\mathrm{EWUE} = E / \mathrm{ET_a} \tag{9}$$

式中, Y 和 E 分别为作物产量和产值。

1.3 统计分析

利用 Microsoft Excle 2010 对试验数据进行分类

整理和图表制作, 利用 SPSS 18.0 数据处理软件对数据进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　不同种植模式的耗水特征

从降雨和灌溉量来看, 2012—2014 年 3 年间冬小麦生育期内降雨量介于 118.5~133.8 mm, 夏玉米生育期内降雨量介于 288.5~564.5 mm; 无论是在降雨丰水年型(2012 年)还是降雨枯水年型(2014 年), 冬小麦生育期内降雨量均不能满足其生长需要, 灌溉水(225 mm)是其耗水量的主要组成部分; 而相比之下降雨是夏玉米耗水量的主要来源, 在降雨丰水年(2012 年)灌溉量(75 mm)仅占夏玉米耗水总量的 14.6%, 在降雨枯水年(2014 年)灌溉量(75 mm)也只占夏玉米耗水总量的 25.1%。SMRF 和 SMSW 模式中, 2012—2014 年 3 年间春玉米生育期内降雨量介于 314.6~514.9 mm, 是春玉米生育期内需水的主要来源; 而 SMSW 模式生育期内的灌溉量在降雨丰水年型(2012 年)和平水年型(2013 年)分别占春玉米周年耗水总量的 22.5%和 13.7%, 在降雨枯水年型灌溉量则占到春玉米全年耗水总量的 32.5%。

从土壤水变化量上看, 2012—2014 年 3 年间冬小麦生育期内土壤 0~200 cm 储水量均下降, 降低幅度介于 48.6~100.4 mm, 而同期夏玉米生育期内土壤 0~200 cm 储水量均上升, 上升幅度介于 31.5~96.5 mm。SMRF 处理的春玉米生育期内土壤 0~200 cm 储水量同样呈下降趋势, 下降幅度介于 9.6~95.4 mm, 在降雨丰水年型(2012 年)下降幅度较小, 在降雨枯水年型下降幅度最大。SMSW 处理 2012—2014 年春玉米生育期内土壤 0~200 cm 储水量在降雨丰水年型和平水年型增加, 增加幅度介于 8.4~26.5 mm, 而在降雨枯水年型表现出下降趋势。

从周年耗水量来看, WS>SMSW>SMRF, 麦玉两熟制的周年耗水量介于 672.9~905.1 mm, SMSW 的周年耗水量介于 431.4~511.8 mm, SMRF 的周年耗水量介于 371.6~482.7 mm(表 2)。2012 年属于丰水年(图 1), SMSW 和 SMRF 的周年耗水量较 WS 分别降低了 48.4%和 54.2%。2013 年降雨属于平水年, SMSW 和 SMRF 的周年耗水量较 WS 分别只降低了 34.5%和 38.7%。在枯水年型 2014 年, 3 种模式的周年耗水量均出现明显的下降, SMSW 和 SMRF 的周年耗水量较 WS 分别降低 35.9%和 44.8%。

表 2　2012—2014 年不同作物及种植模式农田水分构成元素分析
Table 2　Soil water balance components of different crops and cropping patterns from 2012 to 2014　　mm

年份 Year	种植模式 Cropping pattern	作物 Crop	降雨量 Rainfall	灌溉量 Irrigation	土壤水变化量 Soil water content variation	土壤渗漏量 soil water drainage	实际蒸散量 Actual evapotranspiration	周年耗水量 Anniversary evapotranspiration
2012	WS	冬小麦 Winter wheat	118.50	225.00	−82.5±15.5	34.4	391.7±15.5	905.1±16.1
		夏玉米 Summer maize	564.50	75.00	47.2±13.7	78.9	513.4±13.7	
	SMRF	春玉米 Spring maize	466.90	0.00	−6.9±6.5	59.0	414.8±6.5	414.8±6.5
	SMSW	春玉米 Spring maize	466.90	105.00	24.8±1.5	80.0	467.1±1.5	467.6±1.5
2013	WS	冬小麦 Winter wheat	133.80	225.00	−63.6±11.9	35.9	386.5±11.9	780.9±8.3
		夏玉米 Summer maize	476.40	75.00	92.6±4.7	64.5	394.3±4.7	
	SMRF	春玉米 Spring maize	514.90	0.00	−19.3±1.0	51.5	482.7±1.0	482.7±1.0
	SMSW	春玉米 Spring maize	514.90	70.00	12.1±5.4	65.5	507.4±5.4	507.4±5.4
2014	WS	冬小麦 Winter wheat	126.40	225.00	−58.0±12.1	35.1	374.3±12.1	672.9±17.1
		夏玉米 Summer maize	288.50	75.00	21.0±22.3	43.9	298.6±22.3	
	SMRF	春玉米 Spring maize	314.60	0.00	−83.7±10.8	31.1	371.6±7.8	371.6±7.8
	SMSW	春玉米 Spring maize	314.60	140.00	−35.9±8.0	59.1	431.4±8.0	431.4±8.0

2.2　不同种植模式的粮食产量比较

2012—2014 年 3 年间各种植模式单季和周年的产量变化趋势基本一致(图 2)。周年产量上, WS 周年产量显著高于 SMSW 和 SMRF(P<0.05), WS 周年产量介于 12 637.7~15 864.8 kg·hm^{-2}, SMSW 周年产量介于 9 007.8~12 485.4 kg·hm^{-2}, SMRF 周年产量介于 7 140.3~8 435.1 kg·hm^{-2}。试验 3 年间, 与 WS 相比, SMRF 和 SMSW 的平均产量分别降低 24.3%(3 454.0 kg·hm^{-2})和 45.7%(6 500.5 kg·hm^{-2})。单季产量为 SMSW>SMRF>SM(夏玉米)>WW(冬小麦), 其中 SMSW 平均产量比 WW(冬小麦)和 SM(夏玉米)平均产量分别高 60.1%(4 036.9 kg·hm^{-2})和 43.6%(3 265.78 kg·hm^{-2}), SMRF 比 WW 和 SM 产量分别高 14.7%(990.43 kg·hm^{-2})和 2.9%(219.3 kg·hm^{-2})。

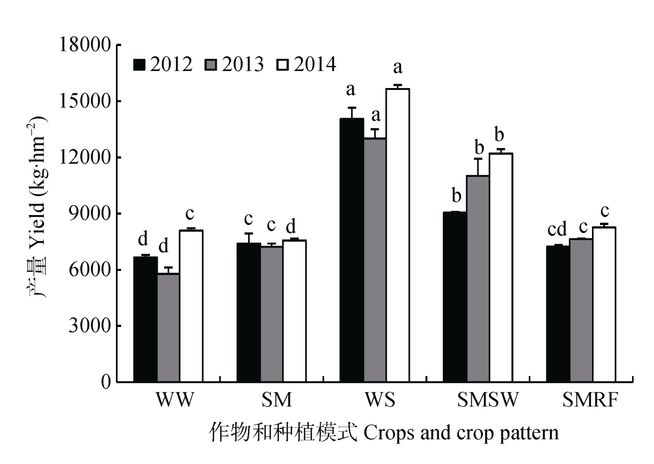


图 2 2012—2014 年不同作物及种植模式的产量

Fig. 2 Yield of different crops and crop patterns from 2012 to 2014

WW: 冬小麦; SM: 夏玉米。图中不同小写字母表示不同年份不同处理之间的差异显著(P<0.05)。下同。WW: winter wheat; SM: summer maize. Different lowercase letters mean significant difference among different treatments in different years at 0.05 level. The same below.

2.3 不同种植模式的经济效益及水分利用效率分析

2.3.1 水分利用效率

2012—2014 年 3 年间不同种植模式周年和单季的水分利用效率差异明显(P<0.05)。周年水分利用效率方面(图 3), 2012—2014 年 3 年间, SMSW 水分利用效率显著高于 SMRF 和 WS, SMSW 和 SMRF 周年水分利用效率较 WS 平均分别高 24.8%和 0.3%。单季作物水分利用效率方面, 2012—2014 年 3 年间水分利用效率为 SMSW>SM(夏玉米)>SMRF>WW(冬小麦)。2012—2014 年 SMSW 的水分利用效率显著高于其他处理, 冬小麦水分利用效率显著低于其他处理, 在 2012 年夏玉米水分利用效率最低, 其由于夏玉米生育期内降雨量较大, 蒸发量上升, 同时也影响到夏玉米的产量, 导致了无效蒸发升高。2012—2014 年单季作物水分利用效率上, SMSW、SM、SMRF 较 WW 平均分别提高 29.2%、8.4%和 3.9%。

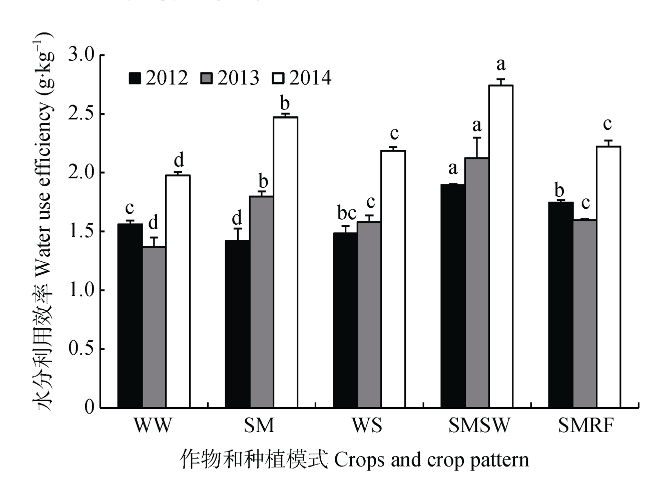


图 3 2012—2014 年不同作物及种植模式的水分利用效率

Fig. 3 Water use efficiency of different crops and crop patterns from 2012 to 2014

2.3.2 经济效益比较分析

2012—2014 年不同模式之间经济效益差异显著(P<0.05)。WS 在 2012—2014 年间经济效益介于 16 543.7~20 477.0 元·hm^{-2}(表 3), SMSW 的经济效益介于 13 170.1~21 046.0 元·hm^{-2}, SMRF 的经济效益介于 10 244.4~13 427.7 元·hm^{-2}, SMSW 和 SMRF 经济效益在 2012—2014 年 3 年间平均较 WS 降低了 5.2%和 36.8%。单季作物之间, 冬小麦在 2012—2014 年经济效益介于 4 666.0~10 216.3 元·hm^{-2}, 夏玉米为 10 260.7~12 060.6 元·hm^{-2}。SMSW、SMRF、SM(夏玉米)和 WW(冬小麦)在 2012—2014 年 3 年间经济效益平均值 SMSW>SMRF>SM(夏玉米)>WW(冬小麦), SMSW、SMRF、SM 分别较 WW 提高 153.6%、68.9%和 67.3%。

表 3 2012—2014 年不同作物及种植模式的经济效益

Table 3 Economic benefits of different crops and cropping patterns from 2012 to 2014 ¥·hm^{-2}

年份 Year	种植模式 Cropping pattern	作物 Crop	作物投入 Inputs	经济产值 Outputs	作物效益 Crops benefits	模式收益 Patterns benefits
2012	WS	冬小麦 Winter wheat	9 605.9	15 160.5	5 554.5	17 615.1
		夏玉米 Summer maize	5 320.7	17 381.3	12 060.6	
	SMRF	春玉米 Spring maize	7 706.3	17 950.7	10 244.4	10 244.4
	SMSW	春玉米 Spring maize	9 277.9	22 447.9	13 170.1	13 170.1
2013	WS	冬小麦 Winter wheat	9 680.9	14 346.9	4 666.0	16 543.7
		夏玉米 Summer maize	5 320.7	17 198.4	11 877.7	
	SMRF	春玉米 Spring maize	7 706.3	18 558.0	10 851.7	10 851.7
	SMSW	春玉米 Spring maize	9 166.5	26 769.1	17 602.6	17 602.6
2014	WS	冬小麦 Winter wheat	9 680.9	19 897.2	10 216.3	20 477.0
		夏玉米 Summer maize	5 320.7	15 581.4	10 260.7	
	SMRF	春玉米 Spring maize	7 706.3	21 134.0	13 427.7	13 427.7
	SMSW	春玉米 Spring maize	10 192.1	31 238.1	21 046.0	21 046.0

2.3.3　经济水分利用效率

分析 2012—2014 年种植模式及作物的经济水分利用效益(图 4)，可以看出不同种植模式及作物的经济水分利用效率存在显著差异($P<0.05$)。2012—2014 年 3 年间 SMSW 经济水分利用效率显著高于 SMRF 和 WS, SMSW 和 SMRF 的经济水分利用效率较 WS 平均分别高 56.7%和 17.5%。单季作物来看，2012—2014 年 3 年间 WW(冬小麦)经济水分利用效率显著低于其他处理，较 SMSW 和 SMRF 分别降低 51.9%和 35.9%。在 WS 模式下，WW 经济水分利用效率较 SM(夏玉米)和 WS 的经济水分利用效率分别降低 39.1%和 24.7%。

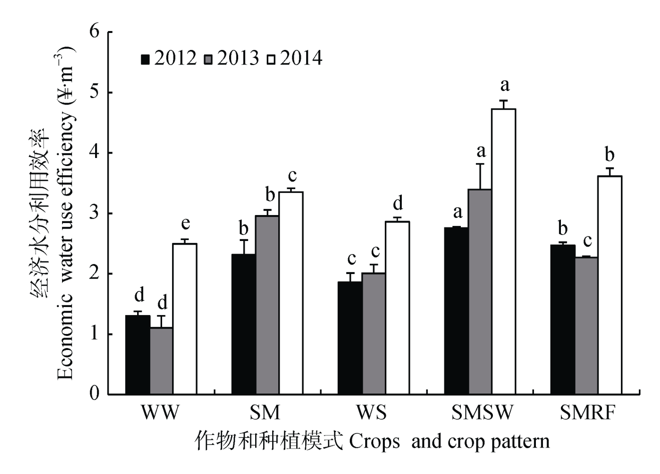


图 4　2012—2014 年不同作物及种植模式的经济水分利用效率

Fig. 4　Economic water use efficiency (EWUE) of different crops and cropping patterns from 2012 to 2014

3　结论与讨论

3.1　不同作物及种植模式的耗水量

WS 是河北低平原区主要的种植模式，在农业水资源危机日益加剧的大背景下，围绕着冬小麦、夏玉米及冬小麦轮作夏玉米周年节水高产技术进行了大量的研究，已经取得了许多研究成果[20–22]。本研究中 WS 借鉴了王志敏等[23–24]研究建立的“吴桥模式”，在 2012—2014 年 3 年间 WS 周年耗水量介于 672.9~905.1 mm，2012 年属于降雨丰水年型，在当年 8 月份的降雨量远超历年平均水平，甚至造成局部的涝害，2012 年 WS 的周年耗水量为 905.1 mm，为试验 3 年中最高；2013 年、2014 年分别属于降雨平水年型和枯水年型，WS 的周年耗水量分别为 780.9 mm 和 672.9 mm，这与 Liu 等[25]利用田间大型蒸渗仪观测到的华北平原冬小麦轮作夏玉米一年两熟制周年耗水量 800~900 mm 基本一致。在 WS 模式下，冬小麦在试验 3 年间耗水量平均为 384.2 mm，灌溉量(225 mm)占冬小麦生育期内耗水量的 58.6%，而降雨(126.2 mm)只占到耗水量的 32.9%，在试验 3 年间，降雨年型对冬小麦生育期内降雨总量影响较小(降雨量的变异系数为 6.1%)，因此冬小麦需要抽取地下水灌溉来保证产量；夏玉米在试验 3 年间耗水量平均为 402.1 mm，降雨量平均为 443.1 mm，在降雨丰水年型和平水年型，夏玉米生育期内的耗水量与累计降雨量基本持平，在降雨枯水年型(2014)，降雨占到其生育期内耗水总量的 96.6%。SMSW 和 SMRF 在试验 3 年间平均耗水量分别为 470.1 mm 和 421.6 mm, SMSW 稍高于平均累计降雨量 432.1 mm, SMRF 生育期内受到一定程度的干旱胁迫。在降雨枯水年型(2014 年), SMSW 和 SMRF 0~200 cm 土壤储水量分别降低 35.9 mm 和 88.1 mm。SMRF 处理通常在生育前期(6 月中旬以前)遭受一定程度的干旱胁迫，对土壤储水量消耗较大，相比之下 SMSW 和夏玉米在降雨丰水年型和平水年型(2012—2013 年)，生育期前后土壤储水量变化量较小，而在降雨枯水年型(2014 年)土壤储水量有明显降低，但也远低于 SMRF。以上表明，WS 模式下，冬小麦生育期内耗水量远高于有效降雨总量，其耗水依赖于土壤储水和灌溉水，夏玉米生育期内有效降雨基本满足其需水量；在 SMSW 和 SMRF 模式下，通过播种期的调整，降雨是春玉米生育期内耗水主要来源，并且冬季的休闲期降雨能够有效补充土壤储水。

3.2　不同种植模式的产量

当前技术条件下，WS 相比 SMSW 和 SMRF 具有一定的产量优势。刘明等[26]研究认为春玉米一熟制较冬小麦轮作夏玉米一年两熟制总产量损失 40%以上，提出春玉米–冬小麦–夏玉米两年 3 熟模式，并将周年产量损失降到 20%以下。本研究中, SMSW 和 SMRF 较 WS 周年产量 3 年间平均分别降低 24.3%和 45.7%。传统上认为春玉米比夏玉米具有更高的产量潜力，因为前者可以在生产上灵活选择播期和晚熟品种，而后者生育期往往受到冬小麦的限制，只能选择早熟品种或者收获未完全成熟的品种，这些因素限制了该地区夏玉米的生产潜力。戴明宏等[15]研究表明该地区春玉米的产量潜力在 13 000~16 000 kg·hm^{-2}。本研究在试验年间通过不断优化春玉米的高产技术体系, SMSW、SMRF 与 WS 的产量差在不断缩小，尤其是 2014 年 SMSW 产量达到 12 072.8 kg·hm^{-2}，只比当年 WS 周年产量降低 22.0%。WS 在试验 3 年间平均产量为 14 236.3 kg·hm^{-2}，变异系数为 9.3%，说明在当年条件下, WS 的产量相对

稳定。本研究中 WS 模式下，冬小麦产量介于 5 586.9~8 208.1 kg·hm^{-2}，而夏玉米产量介于 6 956.4~8 001.7 kg·hm^{-2}，这与王志敏等[23]在该地区的研究结果基本一致。综合来看 WS、SMSW、SMRF 3 种模式下，单季产量春玉米的最高、夏玉米其次，冬小麦产量最低。

3.3 不同种植模式的水分利用效率、经济效益和经济水分利用效率

水分利用效率(WUE)是评价缺水条件下农业可持续发展的核心，也是评价干旱、半干旱地区种植制度优劣的重要依据[27]。本研究中，SMSW 在试验年间 WUE 显著高于对照 WS 和 SMRF。降雨枯水年型的 WUE 高于降雨丰水年型，这主要由于该区域降雨主要集中在 7 月、8 月，这一时期又是全年温度最高的时段，导致无效蒸发升高，如 2012 年 8 月份因降雨量过大甚至造成局部的涝灾。从单季作物来看，SMRF 主要受限于生育早期降雨较少(5—6 月份)，导致春玉米出苗率和出苗的整齐度降低，后期的产量受到影响，若在这一时期适量补充灌溉，春玉米的产量会有显现的提升。WS 模式下，一方面冬小麦单季产量最低，另一方面，由于玉米是 C4 作物，对水分、养分及光照的利用效率高于 C3 作物小麦，这些因素造成了冬小麦的 WUE 显著低于 SMSW、SMRF 和夏玉米，杨晓琳[28]在栾城试验站的研究中也得到类似的结论。

从经济效益上来看，随着春玉米高产技术的改进，春玉米产量的提高，SMSW 的净收益与 WS 的差距逐渐缩小。单季作物净收益而言 SMSW>SMRF>SM(夏玉米)>WW(冬小麦)，冬小麦(WW)在产量和价格上与春玉米相比均处于劣势。值得注意的是在试验年间，一方面春玉米上市日期比夏玉米提前，并且正处于市场玉米供应相对短缺的窗口，春玉米的价格相比夏玉米仍有一定的优势；另一方面现阶段在计算灌溉成本时并未计算水价，随着该地区未来水资源危机进一步加剧，有学者提出在该地引入水价调节[29]，在这种背景下，未来 SMSW 的净收益同 WS 的差距将会进一步缩小。在 2012—2014 年 3 年间，WW 的经济水分利用效率(EWUE)最低，而相比之下，SMSW 模式具有最高的经济水分利用效率。春玉米本身具有较高的生产潜力，降雨耦合度高于冬小麦，在生育期内提供少量的灌溉便能获得较大经济效益回报。因此，在今后的研究中，通过调整种植模式实现周年系统性节水具有巨大的潜力。

参考文献 References

[1] 石建省, 李国敏, 梁杏, 等. 华北平原地下水演变机制与调控[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 527–534
Shi J S, Li G M, Liang X, et al. Evolution mechanism and control of groundwater in the North China Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(5): 527–534
[2] 康绍忠, 蔡焕杰, 冯绍元. 现代农业与生态节水的技术创新与未来研究重点[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 1–6
Kang S Z, Cai H J, Feng S Y. Technique innovation and research fields of modern agricultural and ecological water saving in the future[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 1–6
[3] Yang X L, Chen Y Q, Pacenka S, et al. Recharge and groundwater use in the north china plain for six irrigated crops for an eleven year period[J]. PLoS One, 2015, 10(1): e0115269
[4] Yang X L, Chen Y Q, Pacenka S, et al. Effect of diversified crop rotations on groundwater levels and crop water productivity in the North China Plain[J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 428–438
[5] Yang X L, Gao W S, Shi Q H, et al. Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the Huang-Huai-Hai farming region[J]. Agricultural Water Management, 2013, 124: 20–27
[6] Meng Q F, Sun Q P, Chen X P, et al. Alternative cropping systems for sustainable water and nitrogen use in the North China Plain[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 146(1): 93–102
[7] Liu J H, He X, Qin D Y, et al. Water cycle evolution in the Haihe River Basin in the past 10000 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(27): 3312–3319
[8] 杨丽芝. 德州深层地下水位降落漏斗演变机制与可调控性研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2009
Yang L Z. From principle and controlling-adjusting research about deep groundwater depression cone in Dezhou[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2009
[9] 吴泽新. 气候变化对黄淮海平原主要粮食作物的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2007: 13–17
Wu Z X. The effects of the climate change on the main grain crop in the Huang-Huai-Hai Plain[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007: 13–17
[10] 吴凯, 谢明. 黄淮海平原农业综合开发的水文水资源条件及其开发对策[J]. 农业工程学报, 1997, 13(1): 101–106
Wu K, Xie M. The conditions and development measures of hydrology and water resources for comprehensive development of agriculture in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(1): 101–106
[11] 张利, 王金珍, 朱福星. 海河平原区生态水利工程体系研究[J]. 生态学报, 1992, 12(2): 181–185
Zhang L, Wang J Z, Zhu F X. A study on the ecohydraulic engineering system of the Haihe River alluvial plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 1992, 12(2): 181–185
[12] 宫飞. 华北地区结构型节水种植业模式及途径研究——以北京市顺义区为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2003: 101–103
Gong F. Optimization of cropping pattern and planting structure for water-saving in North China Plain — Case study

in Shunyi County in Beijing[D]. Beijing: China Agriculture University, 2003: 101–103
[13] 隋鹏. 黄淮海平原节水种植模式生态经济分析及优化配置研究——以河北省栾城县为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2005: 35–39
Sui P. Eco-economic analysis and optimization scheme on water-saving cropping pattern in Huanghuaihai Plain: A case of Luancheng County in Hebei Province[D]. Beijing: China Agriculture University, 2005: 35–39
[14] 郭步庆, 陶洪斌, 王璞, 等. 华北平原不同粮作模式下作物水分利用[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(1): 53–60
Guo B Q, Tao H B, Wang P, et al. Water utilization of different cropping production systems in North China Plain[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(1): 53–60
[15] 戴明宏, 陶洪斌, 廖树华, 等. 基于 CERES-Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 30–36
Dai M H, Tao H B, Liao S H, et al. Estimation and analysis of maize potential productivity based on CERES-Maize model in the North China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 30–36
[16] 仇焕广, 张世煌, 杨军, 等. 中国玉米产业的发展趋势、面临的挑战与政策建议[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(1): 20–24
Qiu H G, Zhang S H, Yang J, et al. Development of China's maize industry, challenge in the future and policy suggestions[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(1): 20–24
[17] 陶志强. 华北平原春玉米灌浆期高温胁迫调控技术途径研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013
Tao Z Q. Technological solutions of high temperature stress in spring maize during the filling stage in the North China Plain[D]. Beijing: China Agriculture University, 2013
[18] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 等. 黄土丘陵沟壑区不同降水年型下土壤水分动态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1234–1240
Zhang B Y, Xu X X, Liu W Z, et al. Dynamic changes of soil moisture in loess hilly and gully region under effects of different year precipitation patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1234–1240
[19] 袁淑芬, 陈源泉, 闫鹏, 等. 水分胁迫对华北春玉米生育进程及物质生产力的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(5): 22–28
Yuan S F, Chen Y Q, Yan P, et al. Effects of water stress on growth of spring maize and the morphological and physiological reaction during different growth stages in North China Plain[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(5): 22–28
[20] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 211–218
[21] Kendy E, Zhang Y Q, Liu C M, et al. Groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain: Case study of Luancheng County, Hebei Province, 1949–2000[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(12): 2289–2302
[22] Pei H W, Scanlon B R, Shen Y J, et al. Impacts of varying agricultural intensification on crop yield and groundwater resources: Comparison of the North China Plain and US High Plains[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(4): 044013
[23] 王志敏, 王璞, 李绪厚, 等. 冬小麦"四统一"技术体系——节水、省肥、高产、简化栽培[C]//全国小麦栽培科学学术研讨会论文集. 泰安: 中国作物学会, 2006
Wang Z M, Wang P, Li X H, et al. "Four-unitfication" technology of winter wheat water-saving, fertilizer saving, high yield and simplified cultivation[C]. Proceedings of National Academy Symposium of Winter Production. Tai'an: The Crop Science Society of China, 2006
[24] 王璞, 王志敏, 周殿玺, 等. 农艺节水的潜力及小麦节水高产原理与技术[C]//中国作物学会 2005 年学术年会论文集. 北京: 中国作物学会, 2005
Wang P, Wang Z M, Zhou D X, et al. Agronomic water-saving potential, and principle and technology of high-yield and water-save of wheat[C]. Proceedings of Annual Conference of The Crop Science Society of China in 2005. Beijing: The Crop Science Society of China, 2005
[25] Liu C M, Zhang X Y, Zhang Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(2): 109–120
[26] 刘明, 陶洪斌, 王璞, 等. 播期对春玉米生长发育与产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 18–23
Liu M, Tao H B, Wang P, et al. Effect of sowing date on growth and yield of spring-maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1): 18–23
[27] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99–104
Wang H X, Liu C M. Advances in crop water use efficiency research[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 99–104
[28] 杨晓琳. 华北平原不同轮作模式节水减排效果评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 23–25
Yang X L. Effects of diversified crop rotations on conserving groundwater resource and lowering carbon footprint in the North China Plain[D]. Beijing: China Agriculture University, 2015: 23–25
[29] 郭步庆, 陶洪斌, 盛耀辉, 等. 华北平原不同种植模式的水氮利用[J]. 玉米科学, 2013, 21(6): 95–100
Guo B Q, Tao H B, Sheng Y H, et al. Water and nitrogen utilization of different cropping production systems in North China Plain[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(6): 95–100